

視覚システム搭載型自律走行ロボットの開発

吉川 毅, 本間 稔規, 大村 功
鈴木 慎一, 高橋 裕之, 橋場 参生
澤山 一博, 長尾 信一

Development of Autonomous Mobile Robot with Vision System

Takeshi KIKKAWA, Toshinori HONMA, Isao OHMURA
Shinichi SUZUKI, Hiroyuki TAKAHASHI, Mitsuo HASHIBA
Kazuhiro SAWAYAMA, Shinichi NAGAO

抄 録

産業用ロボットの工場内稼働率が高まる中、原子力作業ロボット、介護ロボット、案内ロボットといった非製造業分野におけるロボットのニーズが大きくなってきている。これらのロボットは作業環境下における様々な条件に対応出来るように、自律性が強く求められる。

そこで、本研究では自律走行技術の確立を目的として、建物内のフラットフロア上を自律走行する視覚システム搭載型ロボットの開発を行う。本ロボットは移動空間のマップ情報、視覚情報および各種センサ情報によって環境認識を行いながら目標地点に移動するものであり、福祉補助や運搬作業補助等のサービスロボットへの応用を目指している。

1. はじめに

次世代ロボットの一つとして、自律走行ロボットが挙げられる。自律走行ロボットに要求される機能としては、

- ・特別な環境を整備する必要が無い
- ・人間との共存が可能である
- ・自らが考えて移動することの出来る（すなわち、自律）等が必須である。その利用分野としてサービスロボットやホームロボット、および次世代産業ロボットに実現されることが期待されている。

ロボットが自律した走行を実現するためには、現在位置の認識および周辺環境の認識を行うことが極めて重要な作業となる。これは、人間が見知らぬ目的地に行く際に、地図を見て、時々周囲の環境から現在位置を確認しながら移動するのと同じである。

ロボットが現在位置を認識する上で基本となる技術の一つにデッドレコニングがある。これは、ロボットの内界センサ（ロータリエンコーダ、ジャイロ等）で得られる移動量情報の

累積によって現在位置を推定する手法であるが、誤差が累積していくという欠点を有する。そこで、外界センサによって既知の自然ランドマークを認識し、現在位置の補正を行うという機能を付加することで自律走行が可能になる。

本研究では、これらの基本機能を有し、福祉補助や運搬作業の補助等を想定した自律走行ロボットの開発を進めている。このロボットは視覚システムを主とした複数の外界センサを搭載し、現在位置および環境認識を行いながら自律走行するものであり、視覚、光情報伝送、走行制御モジュールおよびスケジューリング部の4つのシステムで構成される。

本報では、各モジュール毎の設計、試作および基本機能の確認試験を行った結果について述べる。

2. ロボットの概要

本ロボットは画像認識機能を有する視覚システムと、データ転送のための光情報伝送システムを搭載しており、建物内のフラットフロア上を自律走行することが出来る。基本機能

は、移動空間の地図情報と視覚および各種センサ情報により環境認識を行いながら目標地点に移動することである。

図1にロボットのシステム構成を示す。機能毎に視覚、光情報伝送、走行制御モジュールおよびスケジューリング部の4つで構成される。各モジュールは独自のCPUを持って分散処理を行い、スケジューリング部はモジュール間の調整役として機能する。以下に各機能の概要を述べる。

○視覚モジュール

1台のCCDカメラおよび高速画像処理装置ED-IPSYS1((株)エルムデータ製)で構成され、画像情報により自然ランドマークの認識およびロボットの定位を行う。自然ランドマークとして天井、壁および廊下の特徴点(蛍光灯, エッ

ジ, コーナー等)を対象とする。CCDカメラは2自由度を有するステージ上に固定されており、任意方向の画像を得ることができる。

○光情報伝送モジュール

空間伝搬光を利用した光通信により、ロボットと外部装置間で情報の送受を行う。1個の移動局(ロボットに搭載)と複数の固定局で構成され、ロボットの全移動範囲で初期動作指令、ロボットの動作状態および画像処理後のデータ等に関する情報通信を行う。

○走行制御モジュール

経路計画および各種センサ群を利用して、ロボットの走行制御を行う。ロボットは前輪2軸独立駆動, 後輪キャストの

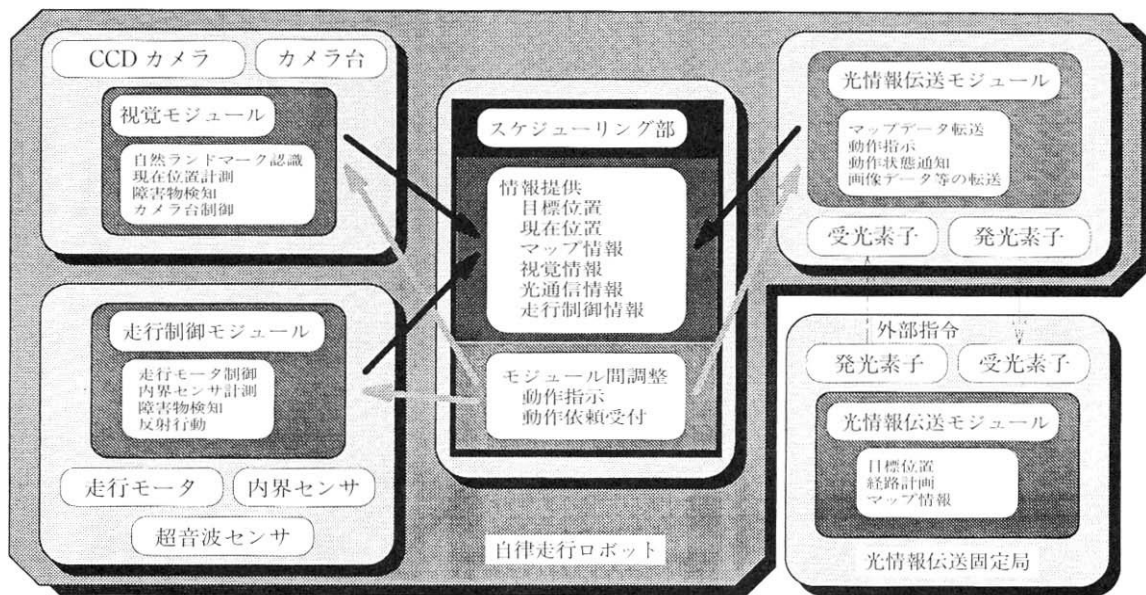
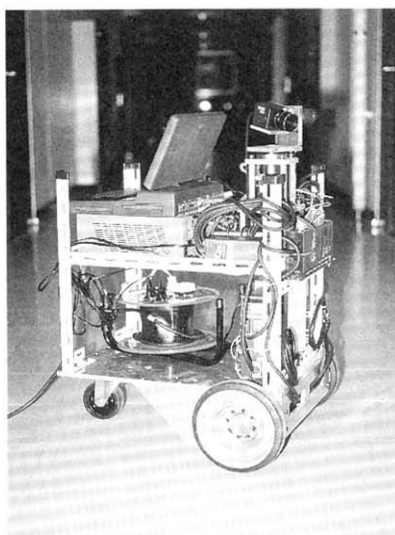
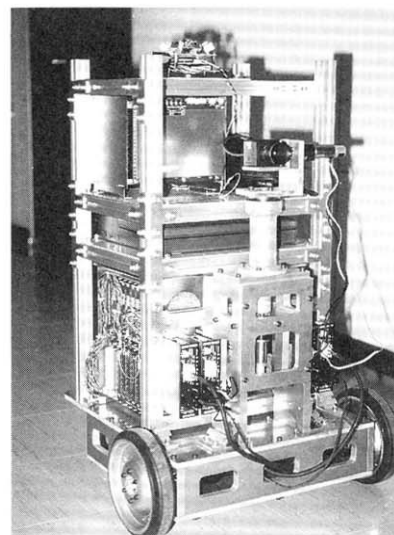


図1 システム構成



W 500 xD 600 xH 780
1号機 (AC 100 V 駆動)



W 550 xD 620 xH 860
2号機 (バッテリー駆動)

図2 走行ロボット

3 輪タイプであり、サーボモータにより駆動される。モータおよびセンサ群はロボットに搭載したパーソナルコンピュータにより制御される。

○スケジューリング部

3つのモジュールからの情報調整を受け持つソフトウェア部分であり、ロボットに搭載するパーソナルコンピュータに組み込まれる。

本年度は2台の走行ロボット本体を試作した(図2)。基本機能は両者同じであるが、1号機はAC100V駆動、2号機はバッテリー駆動である。また、1号機の視覚モジュールは、パーソナルコンピュータと画像処理ボードで構成される。

3. 視覚モジュールの開発

走行ロボットの視覚モジュールには、デッドレコニング走行による位置決め累積誤差の補正および環境状態を認識する機能が要求される。

本報では、屋内の自然ランドマーク(以下ランドマークとする)を用いた自己位置認識手法および実験結果について述べる。

3.1 ランドマークの選定

ランドマークの位置が既知であれば、ロボットは自己位置を認識することが可能である。屋内のランドマークとして次の項目が考えられる。

- 1) 天井, 床, 壁の境界線, 曲がり角などの壁の形状
- 2) ドア
- 3) 照明やスイッチなど壁面に設置された付帯設備
- 4) 机, 棚などの設備

画像解析において立体形状を求める処理は複雑である。画像解析に要する処理時間を考慮するとランドマークは単純形状であることが望ましい。今回は上記の項目のうち、1)の天井, 床, 壁の境界線および3)の照明設備をランドマークとして研究開発を行った。

3.2 解析手法

3.2.1 単眼画像による位置認識

視覚モジュールでは単眼の CCD カメラを用いて二次元画像を得る。したがって、三次元空間での位置を知るためには走行環境に関する既知情報を用いて、不足している一次元分の情報を補う必要がある。ここでは天井, 床, 壁の境界線および蛍光灯をランドマークとし、この場合の既知情報を以下に示す。

- 1) 廊下の高さ, 幅, 蛍光灯の寸法と設置されている位置(図3, 図4)
- 2) 廊下の向かい合う壁は互いに平行
- 3) カメラの姿勢(θ , ϕ)およびカメラの回転軸中心の高

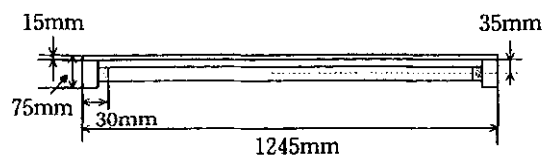


図3 蛍光灯

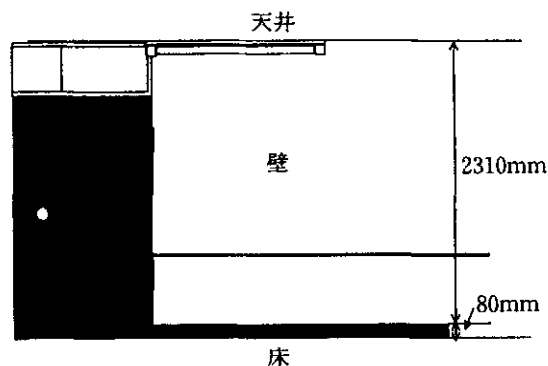


図4 廊下の側面図

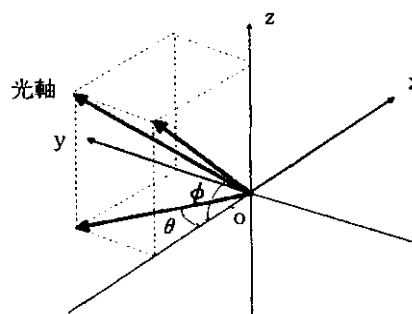


図5 カメラの座標系

さ(図5)

カメラ台中心を原点とする xyz 座標系(図6)における蛍光灯の任意点の座標を(x, y, z)とし、CCD画素面座標系における撮像点の座標を(X_{ccd}, Y_{ccd})とすると、これらの関係は次式で示される。

$$x_{ccd} = -fd \frac{(y \sin \theta + x \cos \theta) \sin \phi + (h + fd + ld) \cos \phi}{-(y \sin \theta + x \cos \theta) \cos \phi + (h + fd + ld) \sin \phi + (fd + ld)} \quad (1)$$

$$y_{ccd} = -fd \frac{-y \cos \theta + x \sin \theta}{-(y \sin \theta + x \cos \theta) \cos \phi + (h + fd + ld) \sin \phi + (fd + ld)} \quad (2)$$

(1)(2)式からランドマーク位置(x, y, z)が求められる。なお、 θ はx軸に対する角度、 ϕ はz軸に対する角度(ともに反時計回りを正とする)、hはカメラ台原点から計測対象までの高さ、fdはCCDカメラのレンズの焦点距離、ldはカメラ台原点からCCD画素面までの距離を表している。

一方、ロボットの移動空間をグローバル座標系とすると、環境地図およびランドマーク位置はこの座標系において既知である。したがって、(1)(2)式から求められる(x, y, z)を基に、グローバル座標系におけるカメラ台中心の位置およびカメラの姿勢を求めることにより、ロボットの現在位置と姿勢

が求められる。

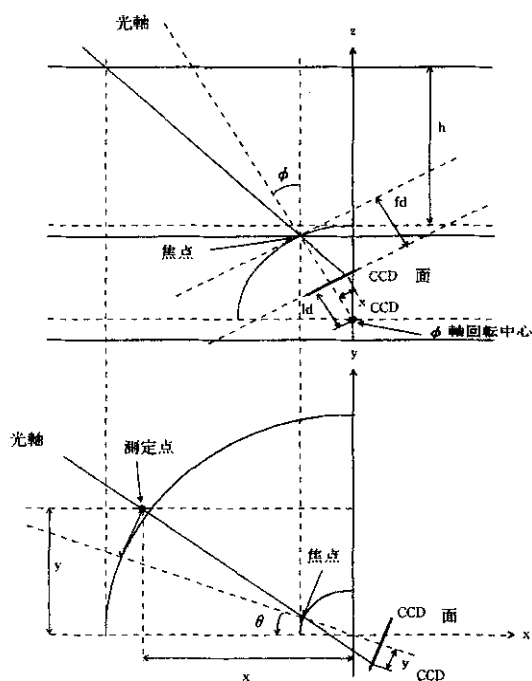


図6 測定体系

3.2.2 画像処理手法

ロボットの自己位置を認識するための画像処理手法を示す。

- 1) デッドレコニングによって得られるカメラの推定位置と姿勢から天井および床と壁との境界線を計算する
- 2) 1) の計算をもとに画像処理を行い、天井および床と壁との境界線を抽出する
- 3) 2) で求めた境界線よりロボットの壁からの位置を計算する
- 4) 2), 3) の結果から蛍光灯の位置を計算する
- 5) 蛍光灯の位置よりロボットの位置を計算する

ここで、2)～3)に関する画像処理手順を示す。

- 1) 原画像について微分フィルタでエッジ成分を強調し、二値化する(図8)
- 2) 1) で得られる画像とは別に原画像を256階調の最大値で二値化し、蛍光灯の近傍を抽出する(図10)
- 3) 図8の雑音成分を除去し、廊下の天井および床と壁の境界線について hough 変換する
- 4) hough 変換によって求めた直線より、蛍光灯の軸を通る直線を求め、図10と組み合わせて蛍光灯の位置を求める(図11)

hough変換では画像の中の任意の画素(X_{CCD} , Y_{CCD})に対し



図7 原画像

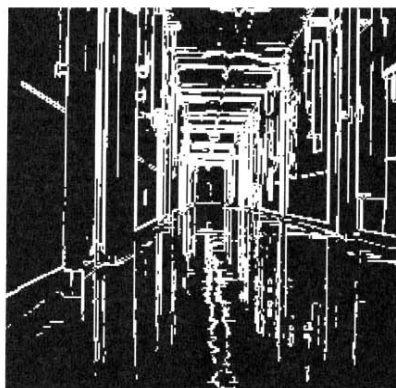


図8 微分, 二値化

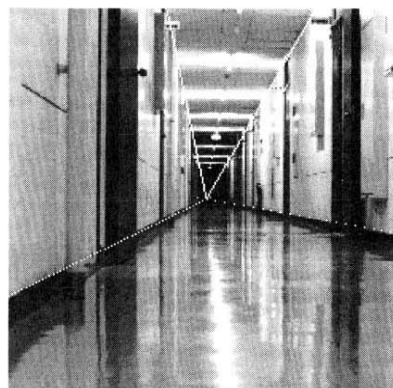


図9 現在の位置より計算した境界線

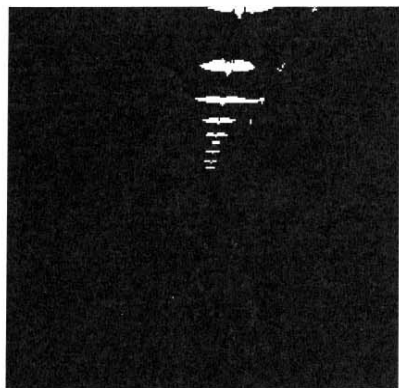


図10 蛍光灯部分の抽出

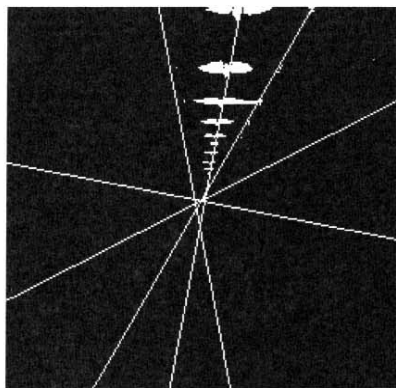


図11 hough変換で求めた直線と蛍光灯の重ね合わせ

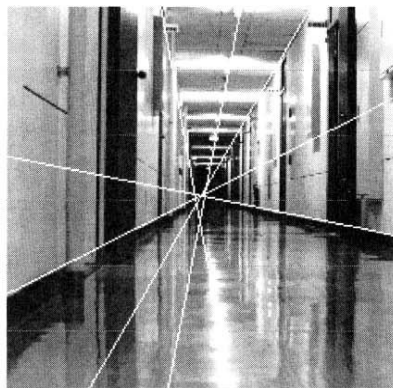


図12 原画像と hough 変換より求めた境界線の重ね合わせ

て、 $\rho = x\cos\theta + y\sin\theta$ で表される $\rho - \theta$ パラメータ空間に写像して軌跡を描き、その軌跡の交わる点(ρ, θ)を求めることによってその任意の画素に対応する直線を求めることができる。この hough 変換は雑音成分による誤検出が少ない、隠蔽などによって特徴点が欠落した場合でも検出が可能である、などの長所がある反面、処理画像の大きさや θ の分解能により計算時間とメモリの使用量が増加してしまうという短所がある[1]。本研究では計算時間を減少させるために、デッドレコニングによって天井および床と壁との境界線の角度を推定し、走査する θ の範囲をこの近傍 ($\pm 5\text{deg}$) に限定している。これにより計算時間が約 110 秒(*1)から約 10 秒(*2)へと大幅に短縮された。

- * 1: 256×256画素を 16×16画素の 256面に分割し、それぞれ θ の範囲を $0(\text{deg}) \leq \theta \leq 180(\text{deg})$ として処理
- * 2: 256×256画素中の推定した境界線の角度 α の $\pm 5\text{deg}$ の範囲の画素について $\alpha - 5(\text{deg}) \leq \theta \leq \alpha + 5(\text{deg})$ の範囲で処理

(使用したハードウェアはともに PC-98 486/90MHz)

3.3 走行環境(廊下)における計測試験

2自由度を有するカメラ制御台(1号機に搭載した装置を利用)に CCD カメラを搭載して、本アルゴリズムを用いた場合の視覚モジュールの位置認識精度に関する試験を行った。カメラおよび走行環境の配置を図 13 に示す。

CCD カメラは SONY 製 XC-77RR 型を使用し、16mm 単焦点レンズを装着して、焦点と絞りは固定とした。認識対象である蛍光灯は 3カ所 (No.1 ~ No.3) を選定し、カメラを y 方向で 3地点 (廊下中心および中心から左右 0.50m) に設置してカメラ角度 (θ, ϕ) を変えた試験を行った。

位置認識精度の評価は、画像解析によって得られた蛍光灯の位置(実験値)と実測値との誤差により行った。なお、今回は画像認識アルゴリズムを開発することに重点をおいたために高速画像処理装置は使用せず、画像処理ボードを搭載したパーソナルコンピュータを用いて画像解析を行った。

試験結果を表 1 から表 3 に示す。但し、表中の記号は、
 X: カメラから測定点までの実測距離 (絶対値表示)
 Y: カメラから廊下中央までの実測距離 ($y < 0$: 廊下中央は

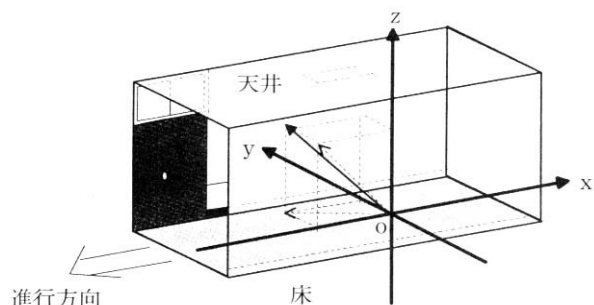


図 13 走行環境

カメラの左側,) $y > 0$: 廊下中央はカメラの右側)

a: 蛍光灯のカメラ側端点 (図 14 参照)

b: 蛍光灯のカメラに対して反対側端点 (図 14 参照)

$\delta x, \delta y$: 蛍光灯位置の実測値 x, y に対する試験値の誤差である。

試験結果より次のことがわかった。

y 方向の誤差 δy はおよそ数 cm 程度、最大で 14cm ($\theta = 0 \text{ deg}, \phi = -5 \text{ deg}$) であり、カメラ角度に影響される傾向がある。これは蛍光灯の y 方向の計測値を天井および床との境界線より計算して求めており、境界線の精度つまり hough 変換の精度に大きく影響されるためと考えられる。したがって、hough 変換のための前処理手法の改良および直線を求めるアルゴリズムの改良によって、計測精度の向上が可能であると思われる。

表 1 $\theta=0(\text{deg}), \phi=0(\text{deg})$ の場合について、カメラの位置を y 軸方向の各点で測定した結果

蛍光灯位置 (図14)	実測値 x(m)	測定位置 y=-0.50m		測定位置 y=0.0m		測定位置 y=0.50m	
		δx (m)	δy (m)	δx (m)	δy (m)	δx (m)	δy (m)
1-a	15.12	-0.78	0.01	-0.95	-0.02	-0.60	-0.04
1-b	16.31	-0.89	0	-0.89	-0.03	-0.49	-0.03
2-a	20.32	-1.04	0	-1.32	-0.04	-1.32	-0.01
2-b	21.51	-1.28	0.02	-1.28	-0.04	-0.94	-0.02
3-a	25.58	-1.85	-0.01	-1.38	-0.05	-1.83	0
3-b	26.76	-2.08	0.02	-1.56	-0.05	-2.06	-0.03

表 2 $y=0$ (廊下中央), $\theta=0(\text{deg})$ の場合について、 ϕ を変化させた場合の結果

蛍光灯位置 (図14)	実測値 x(m)	$\phi=0(\text{deg})$		$\phi=-5(\text{deg})$		$\phi=-10(\text{deg})$	
		δx (m)	δy (m)	δx (m)	δy (m)	δx (m)	δy (m)
1-a	15.12	-0.95	0.02	-0.19	0.13	-0.16	0.02
1-b	16.31	-0.89	0.03	-0.19	0.14	-0.44	0.02
2-a	20.32	-1.32	0.04	0.13	0.13	-0.76	0
2-b	21.51	-1.28	0.04	-0.35	0.14	-1.12	0
3-a	25.58	-1.38	0.05	0	0.11	-	-
3-b	26.76	-1.56	0.05	-0.06	0.12	-	-

表 3 $y=0$ (廊下中央), $\phi=0(\text{deg})$ の場合について、 θ を変化させた場合の結果

蛍光灯位置 (図14)	実測値 x(m)	$\theta=-10(\text{deg})$		$\theta=-5(\text{deg})$		$\theta=0(\text{deg})$		$\theta=5(\text{deg})$		$\theta=10(\text{deg})$	
		δx (m)	δy (m)	δx (m)	δy (m)	δx (m)	δy (m)	δx (m)	δy (m)	δx (m)	δy (m)
1-a	15.12	-0.74	0.05	-0.89	0.13	-0.95	0.02	-0.71	0.09	-0.67	0.05
1-b	16.31	-0.86	0.06	-1.03	0.14	-0.89	0.03	-0.42	0.10	-0.6	0.05
2-a	20.32	-1.06	0.08	-1.27	0.13	-1.32	0.04	-0.94	0.08	-0.67	0.06
2-b	21.51	-1.32	0.08	-1.21	0.14	-1.28	0.04	-1.18	0.08	-0.89	0.07
3-a	25.58	-1.48	0.1	-1.76	0.11	-1.38	0.05	-0.77	0.10	-0.91	0.08
3-b	26.76	-1.76	0.1	-1.48	0.12	-1.56	0.05	-1.44	0.10	-1.6	0.08

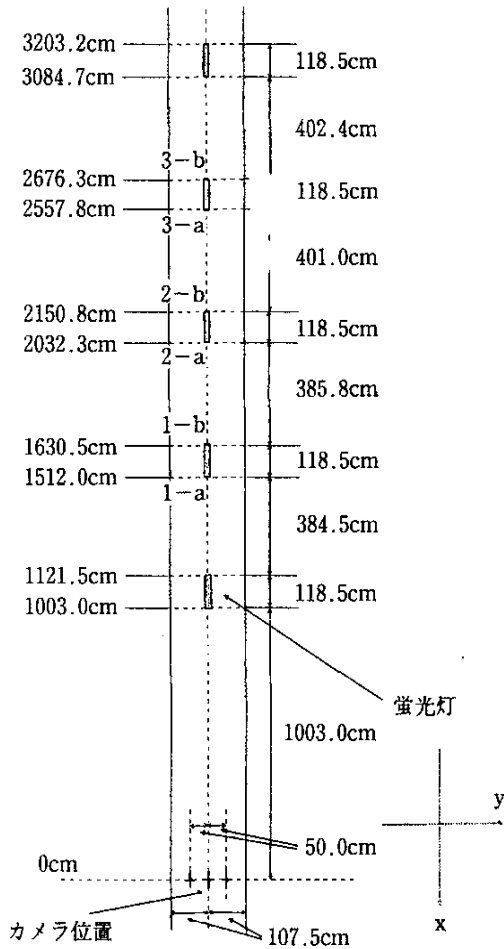


図14 カメラと蛍光灯の配置

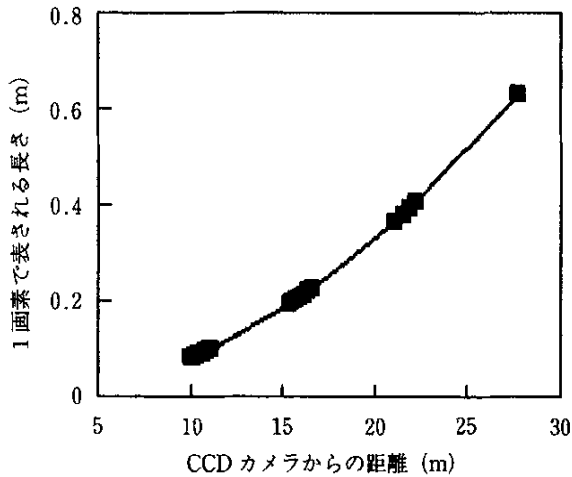


図15 CCDカメラから測定点までの距離と1画素で表される長さの関係

x方向の誤差 δx は数10cm～2.0m程度の大きい値を示す。この主原因は、本アルゴリズムが複数の境界線と蛍光灯の画像データを必要とし、本試験では15m以上の遠距離画像を対象にせざるを得なかったために、遠い位置になるほど

CCD画素面の1画素で表される長さが大きくなることに起因するものである(図15)。また、CCD画素面に写る蛍光灯の大きさが小さくなる、蛍光管の両端のソケット部分が影になるといったカメラ角度に起因する精度低下も含まれる。

しかしながら、15mより遠方の画像情報による位置認識精度としては十分に実用域であると考えられる。よって、今後は本アルゴリズムの近、中距離画像への適用を検討すると共に位置認識精度の向上を図っていく。また、ランドマークの対象範囲の拡大についても検討を行う。さらに、これらの画像解析アルゴリズムを高速画像処理装置IPSYS-1に移植し、処理の高速化に関する検討を行う予定である。

4. 光情報伝送モジュールの開発

移動体を対象とした情報の伝送は、従来、無線電波による伝送が利用されてきた。しかし、無線電波による方法は、電磁ノイズによる影響、電波法の制約のほか、近年の電波利用の増大により他の無線電波との混信の問題が発生してきている。一方、空間伝搬光を用いた情報伝送は、これらの問題点を回避し、比較的容易に情報伝送を実現することが可能であるため、近年、近距離での伝送を中心に応用が進んでいる。

光情報伝送モジュールは光通信のこのような利点を生かし、自律走行ロボットの外部との情報伝達手段として有効な通信システムを提供する。特に自律走行ロボットに搭載するために、以下の機能を実現する。

- ・ロボットの挙動に影響されない通信
- ・ロボットの存在エリアの検知

本報では、移動体への搭載に対応した光情報伝送モジュールの試作および通信試験結果について述べる。

4.1 伝送方式の検討

空間伝搬光を利用した情報伝送は、無線電波による方法の抱える問題点を解決する反面、空気中での拡散・吸収や指向性等の問題により、伝送距離、伝送範囲などの点で制限を受ける。このような制限を考慮した伝送方式として以下の2つの伝送方式が考えられる。

- 1) 指向性の高い送受信装置間で追尾を行いながら通信状態を維持する方式(図16)。
- 2) 広い指向角を持つ複数の送受信装置を用いて、通信可能な送受信装置間で通信する方式(図17)。

方式1)は、伝送距離の点で有利となるが、特に移動体を対象とした情報伝送では、対象物の移動による伝送路の変動が大きな問題となる。安定した伝送状態を維持するためには、送信装置および受信装置を高精度に対峙させるような方向制御を行う必要がある[2]。これまでは、この方式による通信システムの試作実験を行い、その問題点について検討を行ってきた。その結果、追尾性能についてはほぼ期待された結果

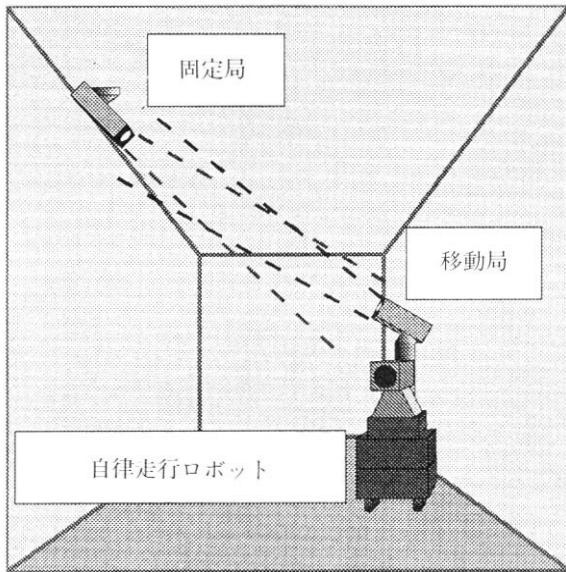


図 16 狭指向性追尾方式

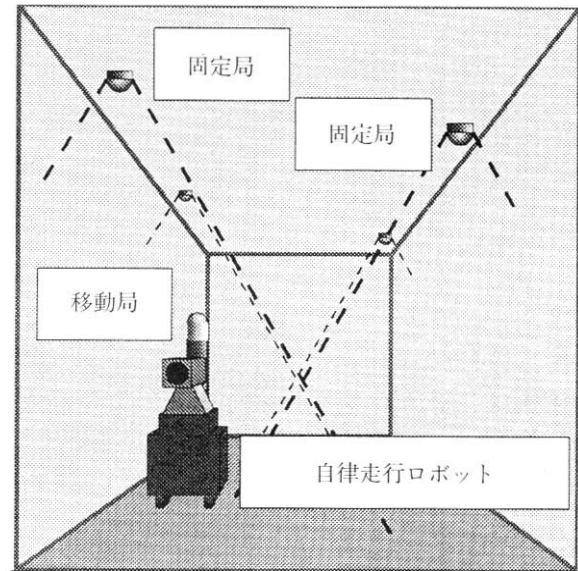


図 17 広指向性複数固定局方式

を得たが、通信モジュールの機構が複雑になるため重量の点で問題となること、さらに本研究におけるロボットの作業環境が複数の部屋などを想定しているため、多数の固定局が必要となりコストの点で問題になることがなどがわかった。

一方、方式 2) は追尾などの方向制御を不用とするが、広範囲に光信号を送るため距離の増大に従い光強度が大きく減衰し、長距離の伝送は難しくなる。このため、多数の固定局の設置が必要となるが、通信モジュール 1 台あたりのコスト、重量とも低減され、方式 1) に比較して有利である。

これらの検討結果から、本モジュールの開発は方式 2) を採用することとした。

4.2 伝送モジュールの開発

図 18 は移動体搭載用に試作した光情報伝送モジュールである。また、そのブロック図を図 19 に示す。本モジュールの開発においては以下の点を考慮した。

- ・移動による通信経路の変化、遮断への対応
- ・送信信号の干渉
- ・位置検出処理

試作した伝送モジュールは、受光素子 1 個と赤外 LED 2 個を一組とした小モジュールを 7 つ使用しており、中央部垂直上方へ向けて 1 つ、その周りに等間隔で水平方向から 30° 上方へ向けて 6 つ配置している。受光素子に受光感度の半値角が 45° のものを使用することで上方からの受信をほぼ全域可能としている。また、発光素子は赤外 LED (東芝製 TLN115 A) を 2 つ一組で使用することで送信強度を上げ、通信エリア内での安定した通信を確保している。光素子の発光強度の半値角はやや狭く、21° となっているが、複数の発光素子を利用することでこの問題に対処している。送信はこれらの発光素子を同時に使用し、多方向への送信を行う。

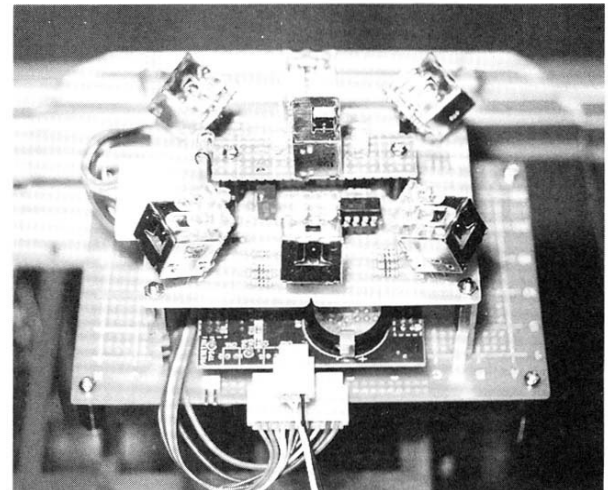


図 18 伝送モジュール

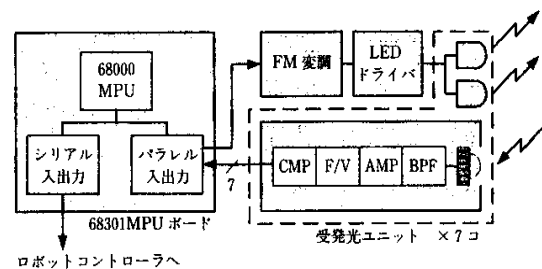


図 19 光情報伝送モジュールブロック図

今回使用した受光素子は、一般的な光リモコン用受光ユニットである。このユニットは可視光の遮断や特定の変調光にのみ反応するなどの機能を有しており、通常の明るい室内でも他の光源に影響されない受信が可能である。一方、リモコンなどの低速通信向けであるため、通信速度が数 kbps に

制限されている。

通信制御およびデータ処理にはモトローラ社の MC68000 を MPU として搭載した梅沢無線電機(株)製のワンボードコンピュータを使用しており、光素子に対してはパラレル入出力ポートを介して制御を行っている。また、ロボットのコントローラとのデータ転送はシリアルポートを使用している。

送信処理においては複数のモジュールからの送信信号の干渉を防ぐため、受信状態をモニタし無信号状態を検出して送信処理を行う。この処理においても干渉の可能性はゼロにはならないが、壁で仕切られた一般的な建物の内部を考えると送信光の届くエリアは限定され、この方式における干渉の起こる可能性は非常に少ないものと思われる。また、正常な受信には確認のためのリプライを返す方式をとるため、送信側はこのリプライを監視することで、エラーの発生をチェックすることができる。エラー発生時には送信元が一定時間において再送を行い、データの欠落を防ぐ方式を採っている。

また、空間伝搬光を利用した通信では様々な要因により、通信経路の遮断という状態が発生する。通信時間が長くなるに従い、遮断や通信経路の変化により通信経路を維持できなくなる確率が高くなるため、本モジュールでは一度に送信するデータの大きさを制限し通信時間を短くすることで対応している。一定の制限を超える大きなデータは一定のサイズの小包に分割し、番号を付与して送信する。受信側ではパケットの番号によりデータの復元を行った後、搭載されているロボットコントローラへデータの転送を行う。

移動体の位置検出は、移動局からの送信データをどの固定局で受信したか、また移動局ではどの方向からその固定局のデータを受信したかにより移動局の存在するエリアを検知する。伝送モジュールの識別は各モジュールへ固有の ID を割り当て、通信データへ埋め込むことで可能とする。固定局の設置間隔が適当であれば、移動体からの送信データは 1 つ以上の固定局で受信され、同時に伝送モジュールにおける受光素子毎の受信状態から送信元の方角を検出することが出来る。これらの情報から移動体の位置を比較的小さなエリアに特定することが出来る。

4.3 試作モジュールによる通信試験

試作した伝送モジュールを用い、以下の通信試験を行った。

- ・受光素子の角度と通信可能距離の測定
- ・試作したモジュールにおける受光可能範囲の確認

実験は、通信速度 3kbps、蛍光灯により照明された屋内の廊下において行った。通信可能距離については、256bit のデータを繰り返し受信し、誤りなく受信できる範囲を通信可能距離とした。また、送信モジュールは受信側へ向けて固定した状態で試験を行った。

その結果、受光素子と発光素子が互いに正対している場合は約 16m まで、受光素子が発光素子に対し 45° 傾いている場

合には約 8m までが通信可能距離であることがわかった。このことから、天井高が 3m 程度の建物では、16m 間隔で固定局を設置すれば十分であると考えられる。

また、受光可能範囲については発光素子から 4m の距離で実験を行い、水平より上方では全ての方位で受信が可能なが確認された。受光素子の指向角が広いため、この距離では 2 つ以上の受光素子で同時に受信することができ、自律走行ロボットの移動や回転による影響は通信時間を限定することで対応可能であることが確認された。また、受光の方角の検出も十分可能であった。

これらの試験により伝送モジュールの基本的な性能が確認された。今後は通信速度の向上、エラー検出機能の強化について検討するとともに、複数のモジュール間での送信信号の干渉やロボットの移動による振動の影響など、実用時の問題点を中心に検討を行っていく。

5. 走行制御モジュールの開発

走行制御系はロボットの基本設計および試作を主におこなってきた。また、経路計画および障害物回避アルゴリズムの開発を行い、これらのアルゴリズムの検証のため、試作ロボットを用いたデッドレコニング法による走行試験を行った。

5.1 経路計画

経路計画はロボットが現在位置から目標位置に到達するための適切な経路を決定する作業である。

本報では、登尾が提案している環境情報を持たないロボットの経路計画アルゴリズム [3] [4] に注目し、周囲に侵入禁止領域を設定した環境モデルにこのアルゴリズムの適用を図った結果について述べる。

経路計画を行うに際して、ロボット形状は円(半径 R)で、環境モデルは任意の多角形で定義する。また、現在位置や目標位置および環境モデルは二次元座標 (x, y) でロボットに与える。以下に本経路計画アルゴリズムを示す(図 20)。

- 1) 環境モデルを、ロボットの $1/2$ 車幅(= R)とモデルとの余裕隙間を加えた分だけ膨張させて再構築する(侵入禁止領域の設定)。
- 2) ロボットは大きさを持たない物体と仮定し、現在位置から目標位置に向かって直進する。再構築されたモデルに衝突した場合、最短距離で当該モデルから離脱できる方向に向かい、モデルに沿って進む。
- 3) 当該モデルから離脱後は目標位置に向かって直進する。
- 4) 2) ~ 3) を繰り返して目標位置に到達する。
- 5) 経路データは直線のデータ群として、環境モデルと共にファイルに保存される。

また、本アルゴリズムを用いて経路計画を行った例を図 21

に示す。

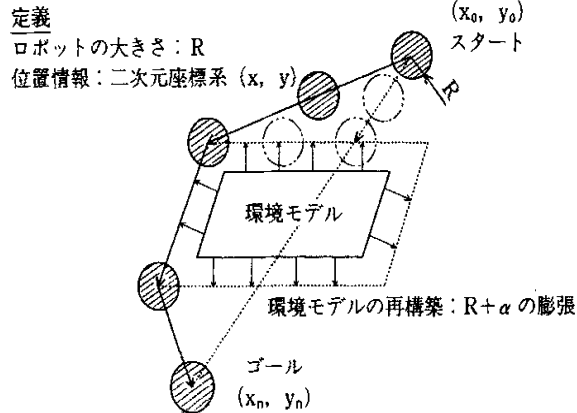


図 20 経路計画アルゴリズム

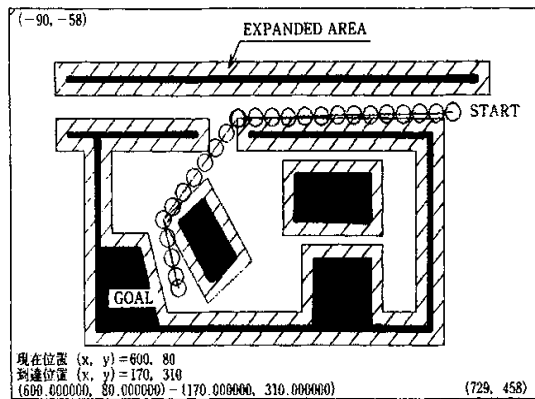


図 21 経路計画例

5.2 障害物回避

自律走行ロボットにとって、未知の障害物に対する回避機能および回避後の経路復帰機能は必須である。

そこで、測距センサを 30deg 間隔で 9 個配置したロボットを想定したモデル (図 22) を作成し、障害物回避アルゴリズムの開発を行うと共に、シミュレーションによる検証を行っ

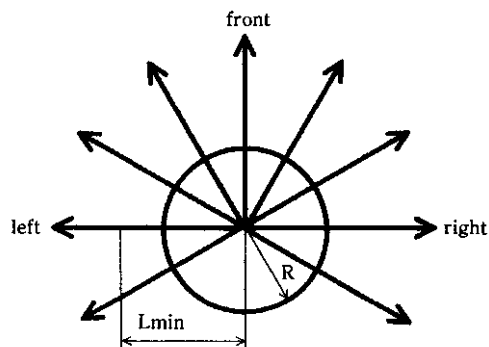


図 22 複数の測距センサを持つロボットモデル

た。センサは指向性の強いものを想定し、前方 $-30 \sim 210 \text{deg}$ の領域の障害物検知を行い、検知領域は各センサ前方の直線上とする。以下に障害物回避の手順を示す。

- 1) 任意のセンサが接近限界である L_{min} を検知すると、当該センサの両側のセンサ出力および L_{min} を検知したセンサ個数やそのセンサ配置から回避方向を決定し、障害物に沿って回避行動を行う。
- 2) ロボットは全てのセンサ出力が L_{min} 以上になった時点で回避完了と判断し、サブゴール (次の到達点) に向かって直進を再開する。ロボットがサブゴールに到達した時点で経路復帰が完了する。

本アルゴリズムのシミュレーション結果を図 23 に示す。ロボットが未知の障害物に対して回避行動を行い、経路復帰していることがわかる。

現在、本シミュレーションモデルに類似の超音波センサシステムを設計中であり、今後、試作ロボットに搭載して本アルゴリズムの実機検証を行う予定である。

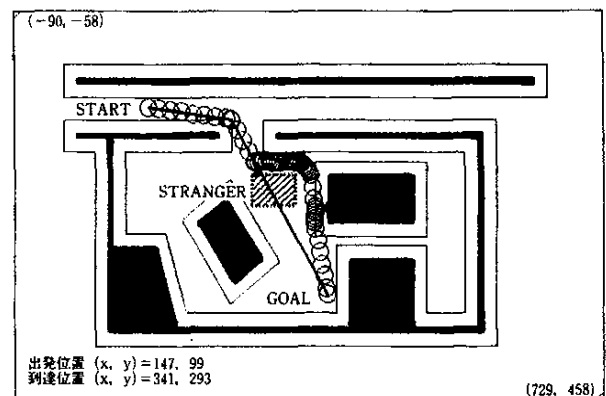


図 23 障害物回避シミュレーション

5.3 走行試験

試作ロボット (1号機, AC100V 駆動) を用いてデッドレコニング走行試験を行った。試験場所は当試験場研究棟 3 階の廊下および研究室内である。試験に先立ち、ロボットの直進走行補正を行い、30m 走行において位置決め誤差は 0.1% 以内であることを確認した。また、ロボットの走行制御はサーボコントロールボードを用いた位置制御により行った。走行前に現在位置と姿勢および目標位置をキー入力して経路データを自動生成し (図 24)、このデータを直進と旋回の走行データに変換して走行を行わせた結果、良好な目標位置到達性能を得ることが出来た (図 25)

目標位置への到達達成度はロボットの初期位置セットにほぼ依存することから、現在進めている超音波センサを含む外界センサシステムの開発とそれを搭載したロボットの走行制御が今後の課題である。

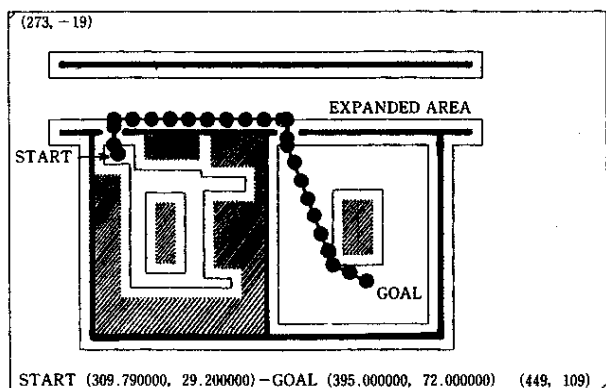


図 24 走行試験 (経路計画)

4. まとめ

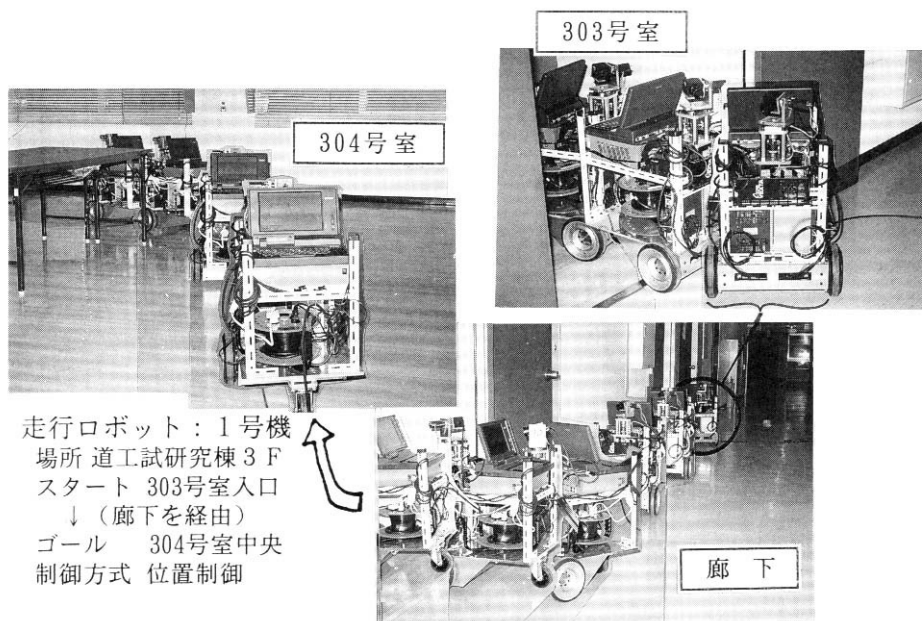
本年度は、各モジュール毎に要素技術開発およびロボット本体の試作を行った。

- ・視覚モジュールは、廊下のエッジや天井の蛍光灯をランドマークに選定し、hough 変換により直線部分の抽出を行って、当該ランドマーク座標（既知）からカメラ位置を求めるアルゴリズムを開発した。
- ・光情報伝送モジュールは試作モジュールの基礎試験を行い、通信速度 3kbps で受光素子と発光素子が正対している場合は 16m、45° 傾いている場合で 8m の通信可能距離が得られることを確認した。
- ・走行制御モジュールは経路計画および障害物回避アルゴリズムの改良を行うと共に試作ロボットによるデッドレコニング走行試験を行い、アルゴリズムの妥当性を確認した。今後はランドマークの認識機能を高めると共に、各モ

ジュールをロボットに搭載して機能確認を行う。また、スケジューリング部および外界センサシステムの開発を行ってロボットの本格的な実走行試験に入る予定である。

参考文献

- [1] 和田俊和, 松山隆司: Hough 変換に基づく図形検出法の新展開, 情報処理 Vol.36No.3 Mar.1995
- [2] 光通信理論研究会:光通信理論とその応用森北出版株式会社 (1988)
- [3] H. Noborio: A Path-Planning Algorithm for Generation of an Intuitively Reasonable Path in an Unknown 2D Workspace, Proc. 1990 Japan-USA FA Symposium, 477-480 (1990)
- [4] H. Noborio: Several Path-Planning Algorithm of a Mobile Robot for an Unknown Workspace and their Evaluation, Proc. IEEE Int. Work. Intel. Motion Control, Vol.1, 289-294(1990)



走行ロボット：1号機
 場所 道工試研究棟 3F
 スタート 303号室入口
 ↓ (廊下を経由)
 ゴール 304号室中央
 制御方式 位置制御

図 25 走行試験